

Primljen / Received: 1.1.2015.

Ispravljen / Corrected: 15.4.2015.

Prihvaćen / Accepted: 3.6.2015.

Dostupno online / Available online: 10.9.2015.

Geopolimerni beton s dodatkom granulirane zgure i crnog pepela rižinih ljuski

Autori:



Prasanna Venkatesan Ramani, dipl.ing.građ.
Nacionalni institut za tehnologiju
Tiruchirappalli, Indija
prasmyth@gmail.com



Izv.prof.dr.sc. **Pazhani K. Chinnaraj**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Anna
Građevinski fakultet
Chennai, Indija
kcpazhani@annauniv.edu

Izvorni znanstveni rad

Prasanna Venkatesan Ramani, Pazhani Kandukalpatti Chinnaraj

Geopolimerni beton s dodatkom granulirane zgure i crnog pepela rižinih ljuski

U radu je prikazano eksperimentalno istraživanje čvrstoće i trajnosti geopolimernog betona s granuliranom zgurom visokih peći i crnim pepelom rižinih ljuski. Geopolimerni beton je prvobitno pripremljen s granuliranom zgurom kao primarnim vezivom umjesto cementa, a zatim je zgura zamijenjena s crnim pepelom rižinih ljuski. Dodatak crnog pepela u geopolimernom betonu iznad 10 % usporava razvoj čvrstoće, ali su takve vrijednosti čvrstoće i dalje iznad ciljane sve dok dodatak crnog pepela u betonu ne prelazi 20 %.

Ključne riječi:

geopolimerni beton, zgura visokih peći, crni pepeo rižinih ljuski, čvrstoća, propusnost klorida, ubrzana korozija

Original scientific paper

Prasanna Venkatesan Ramani, Pazhani Kandukalpatti Chinnaraj

Geopolymer concrete with ground granulated blast furnace slag and black rice husk ash

An experimental study on the strength and durability properties of geopolymer concrete prepared using the ground granulated blast furnace slag and black rice husk ash is presented in the paper. The geopolymer concrete was initially prepared with ground granulated blast furnace slag as the primary binder instead of cement, and then blast furnace slag was replaced with black rice husk ash. The addition of more than 10 % of black rice husk ash in geopolymer concrete retards the strength development, although such strength values are still above the target strength for up to 20 % replacement levels.

Key words:

geopolymer concrete, blast furnace slag, black rice husk ash, strength, chloride permeability, accelerated corrosion

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Prasanna Venkatesan Ramani, Pazhani Kandukalpatti Chinnaraj

Geopolymerbeton mit granulierter Hochofenschlacke und schwarzer Reisschalenasche

In dieser Arbeit werden experimentelle Untersuchungen zur Festigkeit und Beständigkeit von Geopolymerbeton mit granulierter Hochofenschlacke und schwarzer Reisschalenasche (eng. Black Rice Husk Ash) dargestellt. Die Betonmischung wurde zunächst so zubereitet, dass granuliert Hochofenschlacke als Hauptbindemittel anstelle von Zement eingesetzt wurde. Ein Anteil an Reisschalenasche über 10 % führt zu einer langsameren Festigung des Geopolymerbetons, aber die Festigkeit überschreitet trotzdem den gezielten Werten, solange dieser Anteil nicht höher als 20 % ist.

Schlüsselwörter:

Geopolymerbeton, granuliert Hochofenschlacke, schwarze Reisschalenasche, Festigkeit, Chlorid-Permeabilität, beschleunigte Korrosion

1. Uvod

Glavni sastojak betona je obični portland cement (eng. *Ordinary Portland Cement - OPC*), čija proizvodnja ima snažan utjecaj na okoliš. Proizvodnja cementa doprinosi s približno 7% sveukupnoj emisiji stakleničkih plinova u svijetu [1]. Proizvodnja jedne tone običnog portland cementa zahtijeva utrošak 4 GJ energije, pri čemu se u atmosferu emitira približno tona ugljičnog dioksida [2]. Sve sirovine potrebne za proizvodnju cementa su iz neobnovljivih izvora i ubrzano se iscrpljuju. S druge strane, u izobilju se stvara industrijski i poljoprivredni otpad s prirodnim cementnim svojstvima, ali taj se otpad uglavnom odlaže na odlagališta. Primjena navedenog otpada iz industrije i poljoprivrede kao zamjene za cement ima brojne prednosti poput zaštite okoliša, osiguranje održivosti izvora sirovina i rješavanje problema odlaganja otpada. Provođe se opsežna istraživanja za procjenu mogućnosti korištenja industrijskog otpada kao ravnopravne zamjene za obični portland cement i stvaranja visokovrijednog veziva. Jedan od uspješnih pokušaja je geopolimerni beton, za pripremu kojeg je u potpunosti eliminirana upotreba običnog cementa.

Joseph Davidovits je osmislio pojam "geopolimer" 1978., kako bi definirao tip mineralnih veziva kemijskog sastava sličnog zeolitu, ali amorfne mikrostrukture. U usporedbi s običnim portland cementom, glavna veziva u geopolimernom betonu nisu kalcijevi silikatni hidrati (CSHs). Umjesto kalcijeva silikatnog hidrata, ulogu veziva preuzima aluminijev silikat polimerni gel, kojeg formiraju tetraedarski vezani silicij i aluminij s atomima kisika između njih [3]. Dva važna sastojka geopolimernog betona su izvorni materijali (sirovine) i alkalne tekućine. Izvorni materijali moraju biti bogati silicijem (Si) i aluminijem (Al). To mogu biti ili prirodni materijali poput kaolinita, gline i slično, ili nusproizvoda iz industrije poput letećeg pepela, granulirane zgre, silicijske prašine, pepela rižinih ljuski itd. Alkalne tekućine su na bazi topljivih alkalnih metala, najčešće natrija ili kalija. Najčešće primjenjivana alkalna tekućina je kombinacija natrijevog ili kalijevog hidroksida, zajedno s natrijevim ili kalijevim silikatom.

Crni pepeo rižinih ljuski (eng. *black rice husk ash - BRHA*) je poljoprivredno-industrijski otpad koji nastaje preradom riže. Dobiva se spaljivanjem rižinih ljuski u spalionici. Pepeo nastao u takvom procesu izgaranja sadrži veliku količinu neizgorenog ugljika [4]. Stoga je upotreba crnog pepela rižinih ljuski kao građevnog materijala vrlo ograničena, iako sadrži veliku količinu silicija (približno 87-97 %) [5]. Međutim, nekoliko je istraživača, uključujući Chatweera i Lertwattanaruka (2011) te Piyaphanuwata i Asavapisita (2009) dokazalo da dodavanje crnog pepela rižinih ljuski betonu poboljšava njegovu trajnost [6, 7]. Većina dosadašnjih istraživanja o geopolimernom betonu bila je usmjerena na veziva na bazi letećeg pepela. U sklopu ovog istraživanja kao vezivo za geopolimerni beton korišten je industrijski otpad, i to granulirana zgura visokih peći (eng. *ground granulated blast slag - GGBS*) te poljoprivredni otpad, i to crni pepeo rižinih ljuski (BRHA). Granulirana zgura je korištena

kao osnovno vezivo u koje je crni pepeo rižinih ljuski dodavan u različitim postocima kao zamjena dijela granulirane zgre, te je ispitan utjecaj na tlačnu čvrstoću, čvrstoću na savijanje i vlačnu čvrstoću. Također, ispitan je i utjecaj na trajnosna svojstva, kao što je prodor klorida i otpornost na ubranu koroziju.

2. Korišteni materijali

2.1. Granulirana zgura visokih peći

Granulirana zgura dobivena je iz tvornice *JSW Cement Ltd.* u Bellariju, Indija. Kemijski sastav granulirane zgre, određen u laboratoriju *SGS India Pvt. Ltd.* u Chennaiju, Indija, prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Svojstva granulirane zgre i crnog pepela rižinih ljuski

Svojstvo	Granulirana zgura	Crni pepeo rižinih ljuski
SiO ₂	31,25 %	93,96 %
Al ₂ O ₃	14,06 %	0,56 %
Fe ₂ O ₃	2,80 %	0,43 %
CaO	33,75 %	0,55 %
MgO	7,03 %	0,4 %
Gubitak žarenjem	1,52 %	9,79 %
Specifična težina	2,61	2,14
Modul finoće	4550 cm ² /g	5673 cm ² /g

2.2. Crni pepeo rižinih ljuski

Crni pepeo rižinih ljuski dobiven je iz lokalnog mlina. Rižine ljuske su mljevene 30 minuta u okruglom mlinu, a potom prosijane kroz sito otvora 75 μm [8]. Kemijski sastav crnog pepela rižinih ljuski, određen u laboratoriju *SGS India Pvt. Ltd.* u Chennaiju, Indija, prikazan je u tablici 1.

2.3. Sitni agregat

Kao sitni agregat korišten je prirodni riječni pijesak, prema normi IS 383 (1987) [9], modula finoće 3,45 i specifične težine 2,6.

2.4. Krupni agregat

Kao krupni agregat korišten je drobljeni granit, prema normi IS 383 (1987) [9]. Veličina zrna krupnog agregata iznosi 20 mm i manje, specifična težina iznosi 2,87, a modul finoće 8,14. Ispitivanje je provedeno prema normi IS 2386 (1963) [10].

2.5. Alkalne otopine

Mješavina natrijevog hidroksida i natrijevog silikata korištena je kao alkalna otopina. Upotrijebljen je natrijev hidroksid u obliku peleta (97 do 100 % čistoće) i otopina natrijevog silikata sastava



Slika 1. Materijali za geopolimerni beton: a) granulirana zgura, b) crni pepeo rižinih ljuski, c) mješavina natrijevog hidroksida i natrijevog silikata

14,7 % Na_2O , 29,4 % SiO_2 i 55,6 % vode. Molarna koncentracija natrijevog hidroksida uzeta je kao 8 M, a omjer natrijevog silikata i natrijevog hidroksida je kao 2,5.

2.6. Superplastifikator

Superplastifikator na bazi naftalena za smanjenje udjela vode primijenjen je kako bi se poboljšala obradljivost svježeg betona.

2.7. Voda

Dodatna voda u količini od 15 % ukupnog udjela veziva dodana je kako bi se poboljšala obradljivost betona.

3. Sastav mješavina

Budući da zasad ne postoje propisi za projektiranje mješavina geopolimernog betona, gustoća geopolimernog betona je pretpostavljena kao 2400 kg/m^3 , a ostali proračuni su provedeni za tu vrijednost gustoće betona prema proračunu koji su predložili Lloyd i Rangan (2010.) [11]. Ukupan udio sitnog i krupnog agregata u mješavini pretpostavljen je da iznosi 77 %. Omjer sadržaja alkalne tekućine u odnosu na udio veziva odabran je kao 0,4. Postavljena je ciljana čvrstoća od 40 MPa, jer

se ta vrijednost smatra uobičajenom čvrstoćom betona. Sastav mješavina je prikazan u tablici 2.

4. Priprema ispitnih uzoraka

Materijali za mješavine su izvagani i onda najprije miješani u suhom stanju 3 do 4 minute. Tada su alkalna otopina (mješavina natrijevog hidroksida i natrijevog silikata) te superplastifikator dodani u suhu mješavinu. Dodatna voda u količini od otprilike 15 % mase veziva dodana je mješavini kako bi se poboljšala njezina obradljivost. Miješanje je nastavljeno 6–8 min. Beton je ugrađen i zbijen u čeličnim kalupima. Nakon ugradnje, kalupi su smješteni u peć gdje su uzorci sušeni 8 sati na 60°C . Nakon sušenja, uzorci su izvađeni iz peći i iz kalupa. Zatim su dodatno njegovani u peći idućih 8 sati, nakon čega su izvađeni iz peći i njegovani na sobnoj temperaturi do dana ispitivanja.

5. Provedena ispitivanja

5.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća geopolimernog betona ispitana je prema normi IS 516:1959 [12]. Pripremljeni su uzorci u obliku kocke brida 150 mm za svaku mješavinu, a potom je ispitana njihova

Tablica 2. Sastav mješavina geopolimernog betona

Mješavina	Granulirana zgura [kg/m^3]	Crni pepeo rižinih ljuski [kg/m^3]	Krupni agregat [kg/m^3]	Sitni agregat [kg/m^3]	Natrijev hidroksid [kg/m^3]	Natrijev silikat [kg/m^3]	Super-plastifikator [%]	Voda [l/m^3]
GP	394	0	1201	647	45	113	1,5	59
GPR1	355	39	1201	647	45	113	1,5	59
GPR2	315	79	1201	647	45	113	1,5	59
GPR3	276	118	1201	647	45	113	1,5	59

Napomena: GP – referentni beton, GPR1 – mješavina s 10 % crnog pepela rižinih ljuski, GPR2 – mješavina s 20 % crnog pepela rižinih ljuski, GPR3 – mješavina s 30 % crnog pepela rižinih ljuski

tlačna čvrstoća nakon 3, 7 i 28 dana starosti. Svi su uzorci ispitani na hidrauličkoj preši (eng. *Compression Testing Machine*) kapaciteta 2000 kN te su tijekom ispitivanja izloženi jednolikom prirastu opterećenja od 140 kg/cm²/min do sloma. Sila loma je zabilježena kako bi se mogao provesti proračun tlačne čvrstoće.

5.2. Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem provedeno je prema normi IS 4816:1999 [13]. Pripremljeni su uzorci oblika valjka promjera 150 mm i visine 300 mm. Uzorci su ispitani na vlačnu čvrstoću cijepanjem univerzalnim uređajem za ispitivanje (eng. *Universal Testing Machine*) nakon 3, 7 i 28 dana starosti.

5.3. Ispitivanje čvrstoće na savijanje

Ispitivanje čvrstoće na savijanje geopolimernog betona provedeno je prema normi IS 516:1959 [12]. Pripremljene su grede dimenzija 150 mm x 150 mm x 700 mm, a potom su univerzalnim uređajem za ispitivanje ispitane savijanjem do sloma nakon 3, 7 i 28 dana starosti.

5.4. Ubrzano ispitivanje na propusnost klorida

Ispitivanje difuzije klorida (eng. *Rapid Chloride Permeability Test*) provedeno je prema normi ASTM C1202-97 [14]. Navedenim ispitivanjem se mjeri električna vodljivost betona s obzirom na njegovu otpornost na prodiranje iona klorida. Ispitani su uzorci oblika valjka, promjera 95 mm i debljine 50 mm, starosti 28 dana. Razlika napona od 60 V održavana je na krajevima ispitnih uzoraka tijekom 6 sati. Jedan kraj ispitnog uzorka je postavljen u ćeliju sa 3-postotnom otopinom natrijevog klorida, a drugi kraj ispitnog uzorka je postavljen u ćeliju sa 0,3 N otopinom natrijevog hidroksida. Prolazak struje kroz uzorak je mjeren svakih 30 minuta tijekom 6 sati. Praćene su zasićenost kloridom i temperatura. Pomoću tih vrijednosti i vremena izračunan je ukupni naboj koji je prošao kroz uzorke, izražen u kulonima (C), a povezan je s otporom prodoru klorida u uzorak. Što je veća vrijednost naboja, to je veća propusnost uzorka.

5.5. Test ubrzane korozije

Test ubrzane korozije (eng. *Accelerated Corrosion Test*) proveden je na uzorcima oblika valjka, promjera 100 mm i visine 200 mm, s armaturnom šipkom promjera 14 mm koja je ugrađena u sredinu uzorka kako bi se jednaki pokrov održao sa svih strana. Uzorci su nakon ugradnje u kalupe njegovani u peći pri temperaturi od 60 °C tijekom 16 sati, a potom su njegovani na sobnoj temperaturi 28 dana. Uzorci oblika valjka potom su uronjeni u posude napunjene 4-postotnom otopinom natrijevog klorida. Razina otopine je održavana na 75 mm, mjereno od dna ispitnog uzorka, tijekom provedenog ispitivanja. Ploča od nehrđajućeg čelika postavljena u svakoj posudi djelovala je kao katoda, dok je armaturna šipka u uzorku djelovala kao anoda.

Katoda i anoda bile su spojene na konstantni napon od 6 V te je na taj način sustav činio elektrokemijsku ćeliju. Održavan je konstantan napon tijekom ispitivanja, a vrijednosti prolaska struje su mjerene svakog dana. Pri pojavi prve pukotine na pojedinom ispitnom uzorku, ispitivanje na tom uzorku se prekidalo te je potom uzorak uklonjen iz eksperimentalnog postava. Nakon završetka ispitivanja, izveden je graf prolaska električne struje u mA, u odnosu na vrijeme u danima kako bi se odredio početak procesa korozije i periodi širenja korozije. Eksperimentalni postav je prikazan na slici 2.



Slika 2. Test ubrzane korozije – eksperimentalni postav

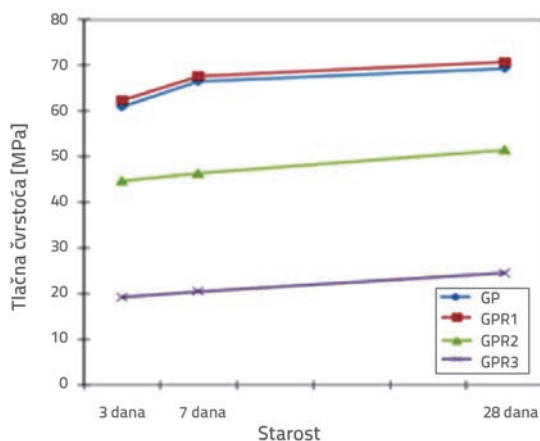
6. Rezultati i rasprava

6.1. Tlačna čvrstoća

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće geopolimernog betona nakon 3, 7 i 28 dana starosti prikazani su u tablici 3. Slika 3 prikazuje varijaciju vrijednosti tlačnih čvrstoća za pojedine uzorke.

Tablica 3. Tlačna čvrstoća geopolimernog betona

Mješavina	Tlačna čvrstoća [MPa]		
	3 dana	7 dana	28 dana
GP	60,9	66,5	69,28
GPR1	62,3	67,6	70,72
GPR2	44,72	46,32	51,46
GPR3	19,24	20,48	24,52



Slika 3. Vrijednosti tlačne čvrstoće geopolimernog betona za različite udjele crnog pepela rižinih ljuski

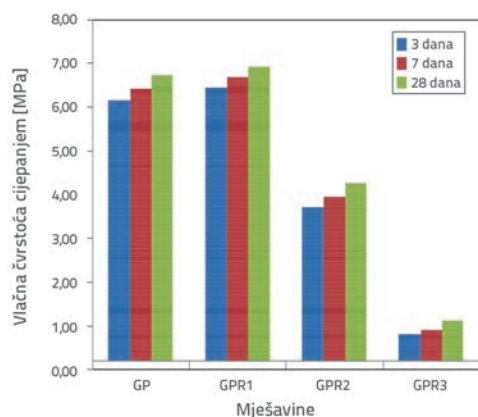
Promatran je utjecaj crnog pepela rižinih ljuski na tlačnu čvrstoću geopolimernog betona. Za referentni uzorak uzeta je mješavina geopolimernog betona sa 100 % granulirane zgre visokih peći. U betonu koji sadrži 10 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski prisutno je malo povećanje čvrstoće koje se može usporediti s čvrstoćom referentnog betona. Veće temperature kojima su uzorci bili izloženi tijekom njegovanja u peći omogućile su značajno otpuštanje iona silicija i aluminija, a time i formiranje snažnijeg polimernog lanca, o čemu su pisali Kusbiantoro i suradnici [15]. Ostale mješavine su imale smanjenu tlačnu čvrstoću u odnosu na referentnu mješavinu. Dodavanje crnog pepela rižinih ljuski bogatog silicijem povećalo je udio neaktivnog silicija. Povećan omjer Si/Al spriječio je reakciju geopolimera unatoč povećanju temperature, o čemu su pisli Duxon i suradnici [16]. Međutim, iz rezultata je vidljivo da je geopolimerni beton s dodatkom crnog pepela rižinih ljuski nadmašio ciljnu čvrstoću od 30 MPa, i nakon 28 dana starosti postigao značajnu čvrstoću od 70,72 MPa za mješavinu s 10 % zamjene, odnosno 51,46 MPa za mješavinu s 20 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski. Uzorci s 30 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski nisu postigli značajne čvrstoće.

6.2. Vlačna čvrstoća cijepanjem i čvrstoća na savijanje

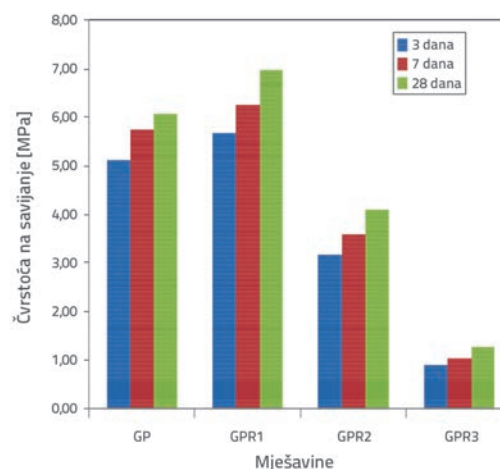
Vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem i čvrstoće na savijanje geopolimernog betona nakon 3, 7 i 28 dana starosti su prikazane u tablici 4. Varijacije vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem i čvrstoće na savijanje za pojedine uzorke prikazane su na slici 4., odnosno na slici 5.

Tablica 4. Vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem i čvrstoće na savijanje

Mješavina	Vlačna čvrstoća cijepanjem [MPa]			Čvrstoća na savijanje [MPa]		
	3 dana	7 dana	28 dana	3 dana	7 dana	28 dana
GP	6,16	6,43	6,74	5,13	5,75	6,06
GPR1	6,47	6,69	6,92	5,69	6,26	6,98
GPR2	3,72	3,94	4,26	3,18	3,57	4,12
GPR3	0,81	0,89	1,12	0,91	1,05	1,27



Slika 4. Vlačna čvrstoća cijepanjem geopolimernog betona



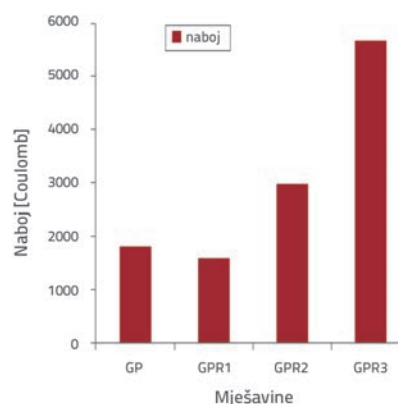
Slika 5. Čvrstoća na savijanje geopolimernog betona

Usporedbom mješavine sa 10 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski (GPR1) s referentnom mješavinom (GP) vidljiv je mali porast i vlačne čvrstoće cijepanjem i čvrstoće na savijanje kod mješavine GPR1. Njegovanje uzoraka u peći, zajedno s povećanim omjerom $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ i većom finoćom čestica crnog pepela rižinih ljuski, može bitno je pridonijelo otpuštanju iona i polikondenzacijskom mehanizmu geopolimernog okvira. S daljnjim povećavanjem udjela crnog pepela rižinih ljuski u mješavinama, dolazi do smanjenja vlačne čvrstoće cijepanjem i čvrstoće na savijanje. Slične rezultate su dobili Jing Liu i suradnici [17] koji su primjenjivali pepeo goriva palminog ulja kao vezivo za geopolimerni beton.

Čestice crnog pepela rižinih ljuski imaju različitu silikatnu strukturu i u slučajevima kad omjer $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ postiže velike vrijednosti, sprječava se kinetika mehanizma polimerizacije, zbog čega se smanjuje brzina proizvodnje geopolimernog gela, o čemu je pisao Kusbiantoro i suradnici [15].

6.4. Ubrzano ispitivanje na propusnost klorida

Rezultati ispitivanja difuzije klorida nakon 28 dana starosti geopolimernog betona prikazani su na slici 6.

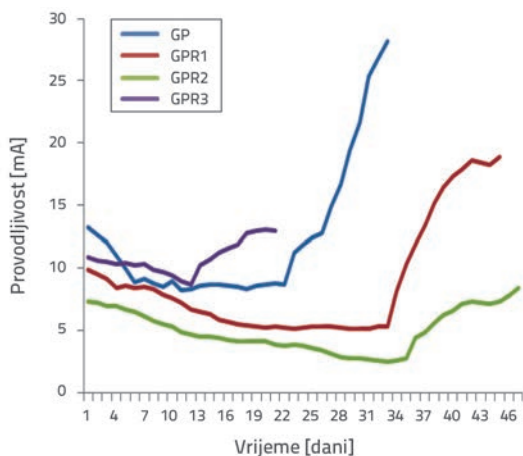


Slika 6. Rezultati ispitivanja geopolimernog betona na propusnost klorida

Ukupni naboj u referentnoj mješavini te mješavinama s 10, 20 i 30 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski iznosio je 1813,2, 1597,5, 2977,5 i 5675,1 C. U mješavini s 10 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski uočeno je smanjenje naboja u odnosu na referentnu mješavinu. Valja naglasiti da s daljnjom zamjenom crnim pepelom rižinih ljuski dolazi do povećanja naboja. Prema klasifikaciji danoj u normi ASTM C1202 [14], naboj prošao kroz uzorke klasificira propusnost klorida kao nisku za referentnu mješavinu i za mješavinu s 10 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski. Propusnost klorida u mješavini s 20 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski je umjerena, dok je u mješavini s 30 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski visoka. Jedan od ključnih faktora koji utječu na propusnost betona je struktura pora. Optimalnom zamjenom crnim pepelom rižinih ljuski smanjuje se prodiranje iona klorida, što je posljedica finih čestica crnog pepela rižinih ljuski koje imaju učinak mikrofilera. Fine čestice popunjavaju pore i rezultiraju kompaktnijom strukturom betona i time smanjenom propusnosti tekućina, što su ustanovili Sampaio i suradnici [18]. Međutim, crni pepeo rižinih ljuski je bogat silicijem, te njegovo prekomjerno dodavanje dovodi do neodgovarajućeg omjera $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. To utječe na kompatibilnost strukture geopolimera i veću provodljivost iona kroz beton.

6.5. Ubrzana korozija

Varijacije provodljivosti uzoraka u mA u odnosu na vrijeme u danima prikazane su na slici 7.



Slika 7. Varijacije provodljivosti uzoraka betona u vremenu

Može se zaključiti da su početne provodljivosti uzoraka stabilne, a tijekom vremena opadaju. To se događa uslijed stvaranja pasivnog sloja geopolimerne matrice što odgađa utjecaj primijenjenog napona na ubrzanje procesa korozije. Tu su pojavu opisali Olivia i Nikraz [19]. Nakon određenog vremena, provodljivost uzoraka naglo raste. Trenutak u kojem se to događa naziva se period inicijacije korozije, a označava početak procesa korozije betona. Migracija ion klorida raste s vremenom, a kada se dosegne kritična razina klorida za upotrijebljenu armaturu, dolazi do depasivizacije, što se očituje naglim

povećanjem struje. Period inicijacije korozije za referentni beton iznosi 23 dana i prve pukotine su se pojavile 33. dan. U betonu s 10 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski, period inicijacije korozije je produžen na 34 dana, a prve pukotine su uočene 45. dan. U betonu s 20 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski, period inicijacije korozije iznosi 36 dana, a prve pukotine su uočene 47. dan, dok je u betonu s 30 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski početni period smanjen na 13 dana, a prve pukotine su se pojavile 23. dan. Na temelju rezultata ispitivanja može se zaključiti da se optimalnom zamjenom crnim pepelom rižinih ljuski u betonu produžuje period početka korozije te odgađa pojava prvih pukotina. Sitne čestice crnog pepela rižinih ljuski pospješuju otpuštanje iona silicija i aluminija i stvaranje jače geopolimerne matrice, stvarajući otporniji pasivni sloj kao zaštitu od prodora iona klorida. Unatoč tome, prekomjeren udio crnog pepela rižinih ljuski u betonu ima negativan učinak na sprječavanje procesa korozije, budući da usporava razvoj jake geopolimerne matrice te time rezultira oslabljenim pasivnim slojem oko armature.

7. Zaključak

Eksperimentalni rezultati pokazuju da je moguće proizvesti geopolimerni beton zadovoljavajuće čvrstoće i trajnosti upotrebom granulirane zgre visokih peći i crnog pepela rižinih ljuski. Na temelju prikazanog istraživanja mogu se izvući sljedeći zaključci:

- Dodatak crnog pepela rižinih ljuski iznad 10 % imao je usporavajući učinak na tlačnu čvrstoću geopolimernog betona. Beton s 20 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski nadmašio je ciljanu čvrstoću, te je njegova čvrstoća nakon 28 dana starosti iznosila 51 MPa. Vlačna čvrstoća cijepanjem i čvrstoća na savijanje pokazale su trend razvoja sličan trendu razvoja tlačne čvrstoće, za iste vrijednosti zamjene crnim pepelom rižinih ljuski.
- Geopolimerni beton je pokazao dobru otpornost na propusnost klorida. Propusnost (prodor) klorida u betonu s 10 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski bila je niska, a u betonu s 20 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski umjerena.
- Dodavanjem crnog pepela rižinih ljuski u geopolimerni beton povećava se otpornost takvog betona na koroziju. Period početka korozije iznosi 34 dana za beton s 10 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski, odnosno 36 dana za beton s 20 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski, dok u slučaju referentnog betona taj period traje samo 23 dana. Moguće je da sitne čestice crnog pepela rižinih ljuski pridonose većem otpuštanju iona silicija i aluminija te stvaranju jačeg pasivnog sloja.
- Upotreba crnog pepela rižinih ljuski iznad 20 % ne pridonosi poboljšanju svojstava geopolimernog betona. Ispitni uzorci s 30 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski nisu postigli značajnu čvrstoću niti trajnost.

Rezultati ispitivanja čvrstoća su pokazali da optimalna količina crnog pepela rižinih ljuski u geopolimernom betonu iznosi 20

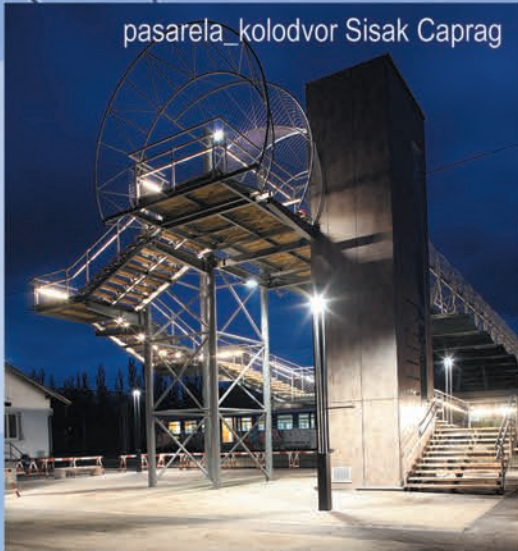
% za ciljanu čvrstoću betona od 30 MPa. Rezultati ispitivanja trajnosti betona su pokazali da beton s 20 % zamjene crnog pepela rižinih ljuski ima izuzetno dobru otpornost na prodor klorida i koroziju. Prikazani rezultati su značajni za razvoj ovakvih novih inovativnih vrsta betona bez upotrebe cementa te

za istraživanje novih alternativnih materijala, poput granulirane zgre i crnog pepela rižinih ljuski u proizvodnji veziva. Budući da su ti materijali primarno nusproizvodi u industriji, prikazana mogućnost njihovog korištenja ujedno predstavlja i rješenje za problem njihovog odlaganja.

LITERATURA

- [1] Malhotra, V.M.: Introduction - Sustainable Development and Concrete Technology, *ACI Concrete International*, 24 (7), p. 22, 2002.
- [2] Mehta, P.K.: Reducing the Environmental Impact of Concrete, *ACI Concrete International*, 23 (10), pp. 61-66, 2001.
- [3] Davidovits, J.: Geopolymers - Inorganic polymeric new materials, *J. Therm. Anal.*, 37 (8), pp. 1633-56, 1991., <http://dx.doi.org/10.1007/BF01912193>
- [4] Krishnarao, R.V., Subrahmanyam, J., Jagadish Kumar, T.: Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash, *Journal of the European Ceramic Society*, 21, pp. 99-104, 2001., [http://dx.doi.org/10.1016/S0955-2219\(00\)00170-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0955-2219(00)00170-9)
- [5] Lanning, F. C.: Silicon in rice, *J. Agric. Food. Chem.*, 11, pp. 435-437, 1963., <http://dx.doi.org/10.1021/jf60129a024>
- [6] Chatweera, B., Lertwattanakul, P.: Durability of Conventional Concretes Containing Black Rice Husk Ash, *Journal of Environmental Management*, 92, pp. 59-66, 2011., <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.08.007>
- [7] Piyaphanuwat, R., Asavapisit, S.: Effect of Black Rice Husk Ash Substituted OPC on Strength and Leaching of Solidified Plating Sludge, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 19, No. 2, pp. 85-89, 2009.
- [8] Rashid, M.H., Ali Molla, M.K., Ahmed, T.U.: Durability of Mortar in Presence of Rice Husk Ash, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 43, pp. 736-739, 2010.
- [9] IS: 383 (1987). Specification for coarse and fine aggregate from natural sources for concrete, 8th Reprint October 1991, Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- [10] IS: 2386 (Part 3) (1963). Methods of testing for aggregates for concrete, Specific Gravity, Density, Absorption and Organic Impurities, Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- [11] Lloyd, N.A., Rangan, B.V.: Geopolymer Concrete with Fly Ash, *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Ancona, Italy, Vol. 3, pp. 1493-1504, 2010.
- [12] IS: 516 (1959). Methods of test for strength of concrete, Amendment No. 2, Reprint 1993, Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- [13] IS: 5816 (1959). Methods of test for splitting tensile strength of concrete, First Revision, Reprint 1999, Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- [14] ASTM C1202 - 10 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
- [15] Kusbiantoro, A., Nuruddin, M.F., Shafiq, N., Qazi, S.A.: The Effect Of Microwave Incinerated Rice Husk Ash On The Compressive and Bond Strength Of Fly Ash Based Geopolymer Concrete, *Construction and Building Materials*, No. 36, pp. 695-703, 2012., <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.064>
- [16] Duxon, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Mallicoat, S.W., Kriven, W.M., Van Deventer, J.S.J.: Understanding the Relationship between Geopolymer Composition, Microstructure and Mechanical Properties, *Colloids and Surfaces, A. Physicochemical and Engineering Aspects*, pp. 47-58, 2005., <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.06.060>
- [17] Jing, Liu M.Y., Chua, C.P., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z.: Utilization of Palm Oil Fuel Ash as Binder in Lightweight Oil Palm Shell Geopolymer Concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, pp. 1-6, 2014.
- [18] Sampaio, J., Coutinho, J.S., Sampaio, M.N.: Portuguese Rice Husk Ash as a Partial Cement Replacement, *International Conference on Sustainable Construction into the next Millennium: Environmentally friendly and innovative cement based Materials*, Joao Pessoa, PB, Brazil, pp. 125-137, 2000.
- [19] Olivia, M., Nikraz, H.R.: Durability of Fly Ash Geopolymer Concrete in a Seawater Environment, *Proc., Concrete 2011 Conference*, Perth, WA, 2011.

pasarela_kolodvor Sisak Caprag



nadstrešnica i peron_kolodvor Vinkovci



kolodvor Okučani



stajalište Karlovac_Centar



Glavni kolodvor Zagreb

Željezničko projektno društvo

Osnovano 1960.

Mi oblikujemo vaše željeznice.
We design your railways.



ŽPD d.d. Trg kralja Tomislava 11, 10 000 Zagreb, Hrvatska
TEL: +385 1 48 41 414, +385 1 37 82 900
FAX: +385 1 6159 424, ŽAT 2900
e-mail: zpd@zpd.hr
www.zpd.hr